

保健物理・環境科学部会セッション
線量「シーベルト」の意味合いとそのとらえ方

“福島事故後の防護措置の 策定に関する線量”

日本原子力学会 2015年春の年会
2015年3月20日(金)

日本原子力研究開発機構/茨城大学大学院
木名瀬 栄*

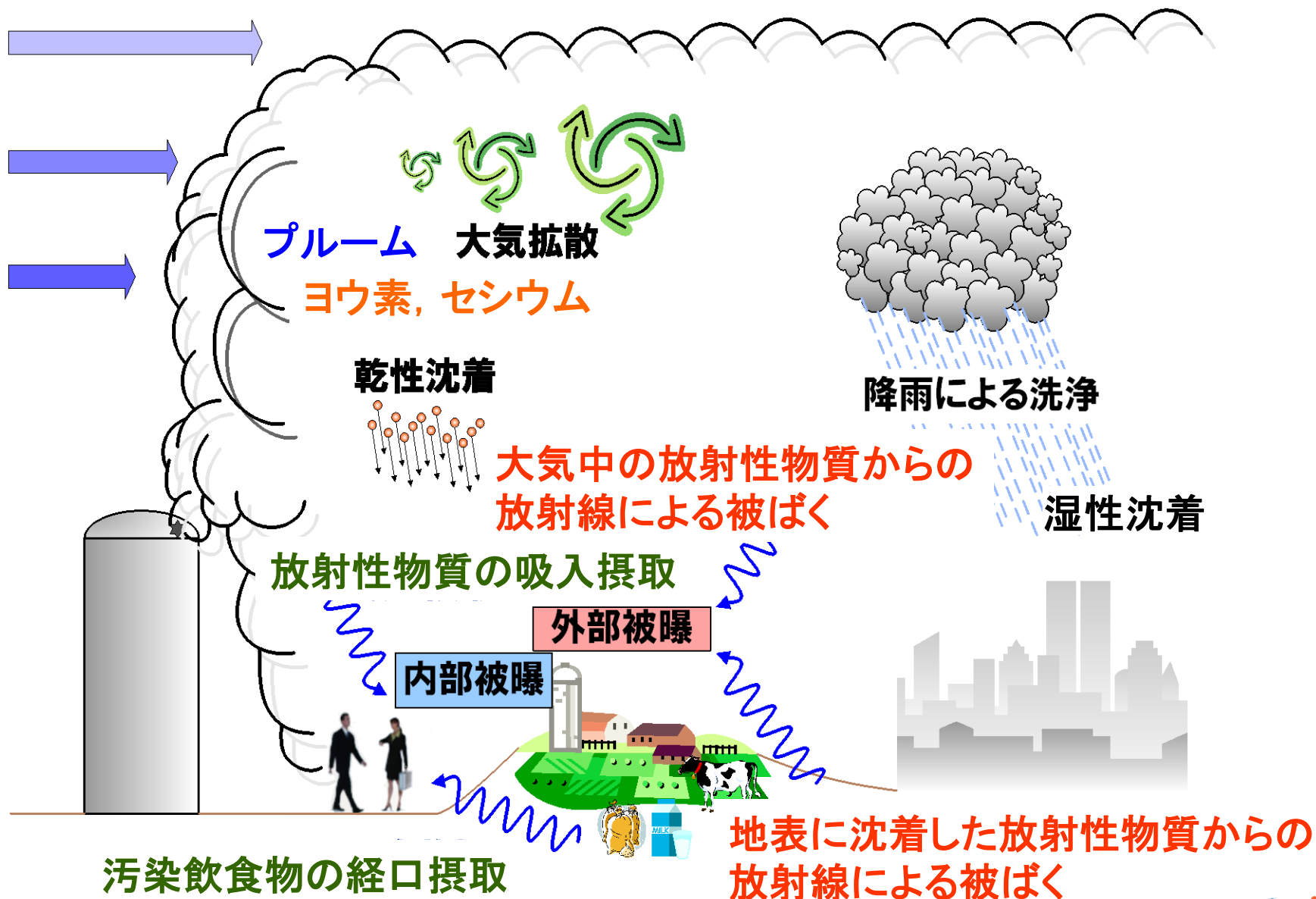
* E-mail: kinase.sakae@jaea.go.jp



内容

- 放射性物質による影響と緊急防護措置
- ICRPの防護規準と我が国の原子力災害対策
緊急時および現存被ばく状況における防護原則の履行
- 防護措置の策定に関する線量

原子力発電所事故による被ばく



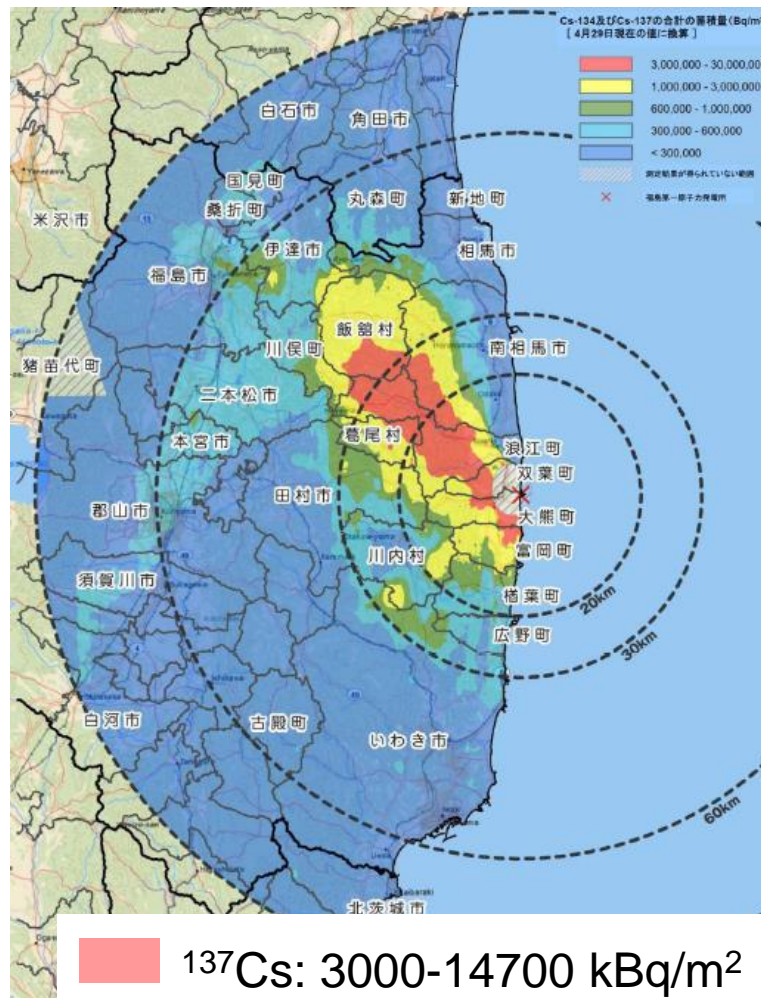
放射性物質による影響

原子力発電所からの放射性物質
 クリプトン, キセノン等の希ガス
 ヨウ素等の揮発性, エアロゾル

↓ プルーム(気体状あるいは粒子状の物質を含んだ空気の一団)として移動

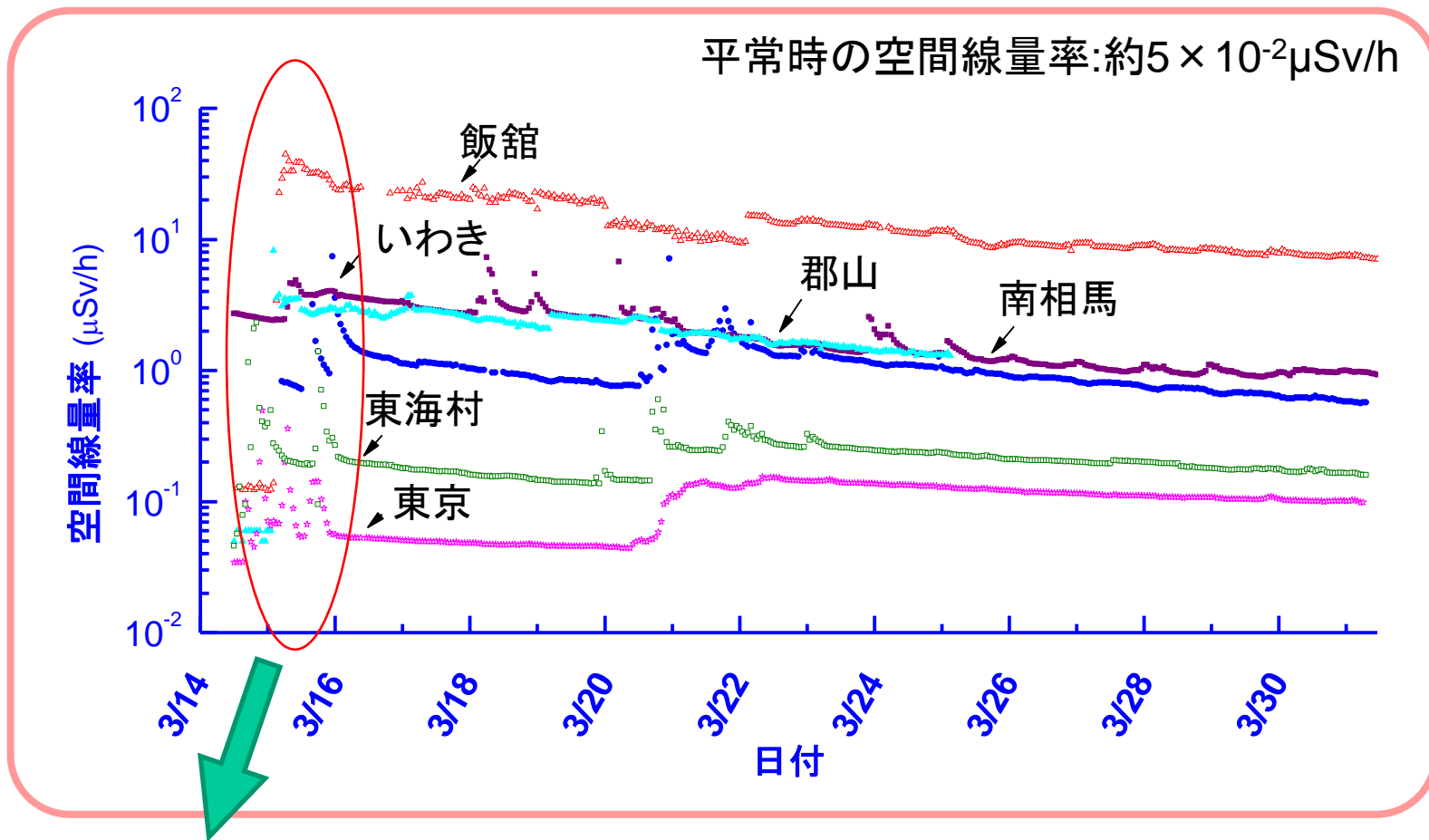
- 大気中の放射性物質
 - 外部被ばく
 - 吸入摂取による内部被ばく
- 地表に沈着した放射性物質
 - 外部被ばく
 - 吸入摂取による内部被ばく
 - 経口摂取による内部被ばく
(汚染飲食物)

セシウムの地表面蓄積量* (2011年4月29日)



*IAEAに対する政府の報告書(2011)より

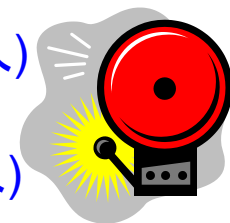
東海村など各地の空間線量率変化



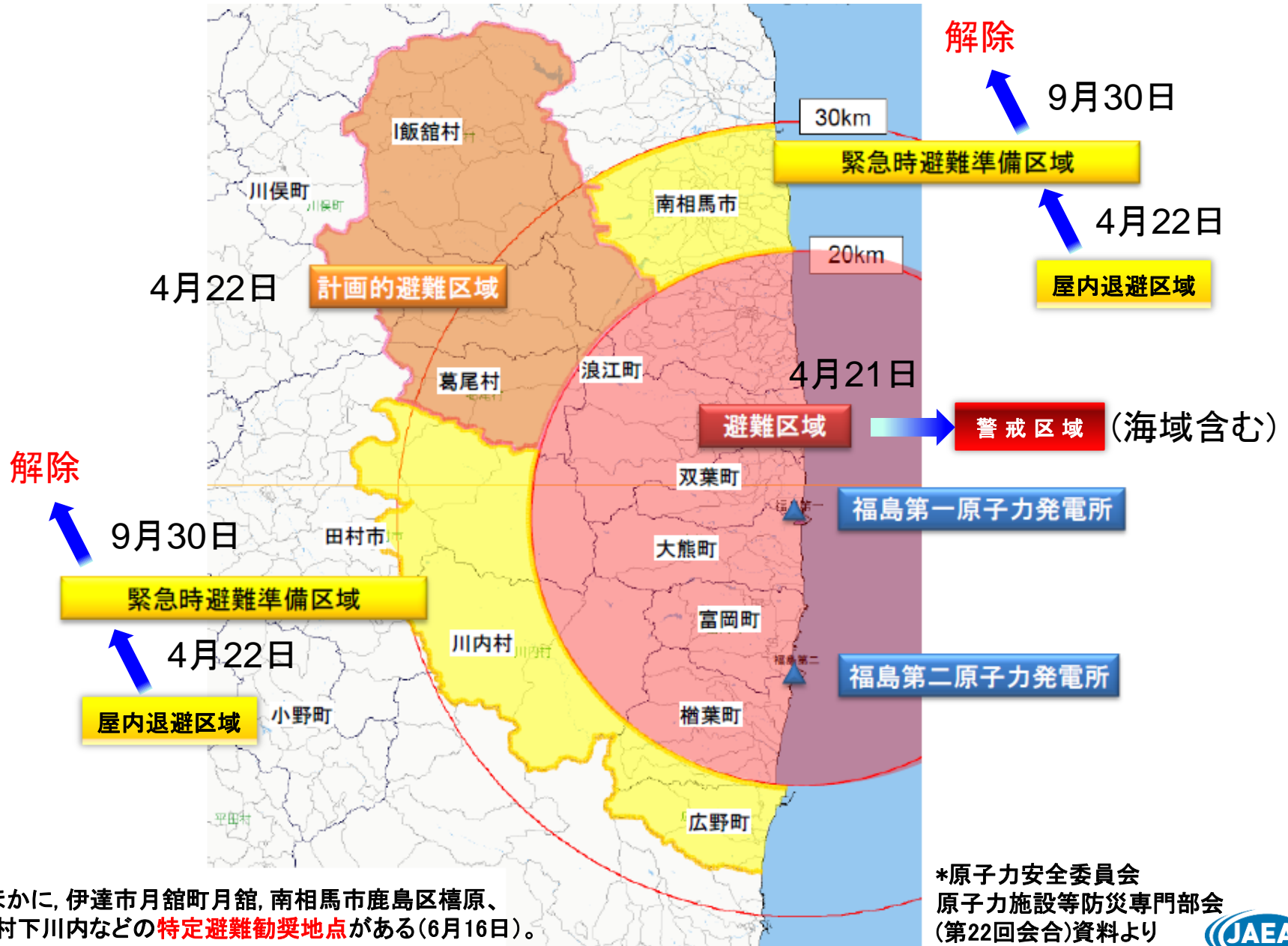
- 3月15～16日の空間線量率上昇は、2号機からの大量の放射性物質の放出によるものと推定されている(正門で最大 11.93mSv/h)。
- 空間線量率が著しく低減しないのは、降雨による湿性沈着の影響と考えられる。

(予防的)緊急防護措置 -避難指示など-

- 3月11日 [20時50分] 福島県知事より指示
発電所から半径2km圏内の住民は、避難(約1,900人)
[21時23分] 原子力災害対策本部長(内閣総理大臣)より指示
発電所から半径3km圏内の住民は、避難(約6,000人)
発電所から半径3~10km圏内の住民は、屋内退避
(1号機が冷却できない状態が継続)
- 3月12日 [5時44分] 原子力災害対策本部長より指示
発電所から半径10km圏内の住民は、避難(約51,000人)
(原子炉格納容器内の圧力上昇のおそれ)
[18時25分] 原子力災害対策本部長より指示
発電所から半径20km圏内の住民は、避難(約78,000人)
(複数号機の同時災害発生リスク)
- 3月15日 [11時00分] 原子力災害対策本部長より指示
発電所から半径20~30km圏内の住民は、屋内退避
(複数号機の同時災害発生)
- 4月21日 [11時00分] 原子力災害対策本部長より指示
避難区域を警戒区域に設定する
- 4月22日 [9時44分] 原子力災害対策本部長より指示
屋内退避指示を解除し、計画的避難区域および緊急時避難準備区域を設定する
- 9月30日 [18時11分] 原子力災害対策本部長より指示
緊急時避難準備区域を解除する



避難等に関する区域設定(2011年)



旧区域設定の根拠

- 避難区域(2011年3月11日～4月21日)
PAZ(3km), EPZ(10km)*を考慮しつつ, 念のため, 事象のリスクに備えた。
原子力安全委員会の指針「原子力施設等の防災対策について」により,
外部被ばくによる実効線量(予測線量)50mSv以上(避難)
(警戒区域:原災法に基づく。)(2011年4月22日～2013年5月7日)
*PAZ:予防的措置範囲, EPZ:防災対策を重点的に充実すべき地域
- 屋内退避区域(2011年3月11日～4月22日)
複数号機において様々な事態が発生し, それらに備えた。
原子力安全委員会の指針「原子力施設等の防災対策について」により,
外部被ばくによる実効線量(予測線量)10～50mSv (屋内退避)
- 計画的避難区域(2011年4月22日～2013年8月7日)
事故発生から1年の期間内に積算線量が20mSvに達するおそれのある区域。
- 緊急時避難準備区域(2011年4月22日～9月30日)
事故の状況が安定していないため, 緊急時の屋内退避や避難の対応が求められる可能性があり得る区域。
- 特定避難勧奨地点(2011年6月16日～)
事故発生後1年間の積算線量が20mSvを超えるとされる特定の地点。

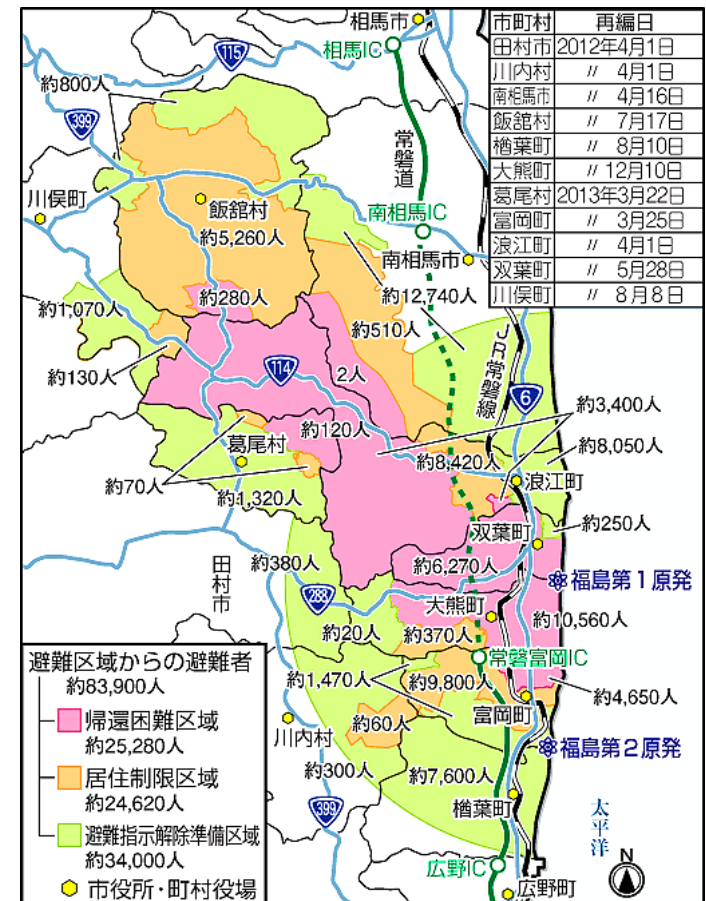
避難等に関する区域設定(2013年)

2013年4月より, 警戒区域および
計画的避難区域は再編

- **避難指示解除準備区域**
年間線量が**20mSv以下**で, 生活環境が
復旧すれば帰還できる地域。
空間線量率**3.8 μ Sv/h以下***
- **居住制限区域**
年間線量が**20~50mSv以下**で, 除染に
より数年後には帰還可能な地域。
空間線量率**3.8 μ Sv/h~9.5 μ Sv/h以下***
- **帰還困難区域**
年間線量が**50mSv超**で, 5年以上帰還が
難しい地域。
空間線量率**9.5 μ Sv/h超***

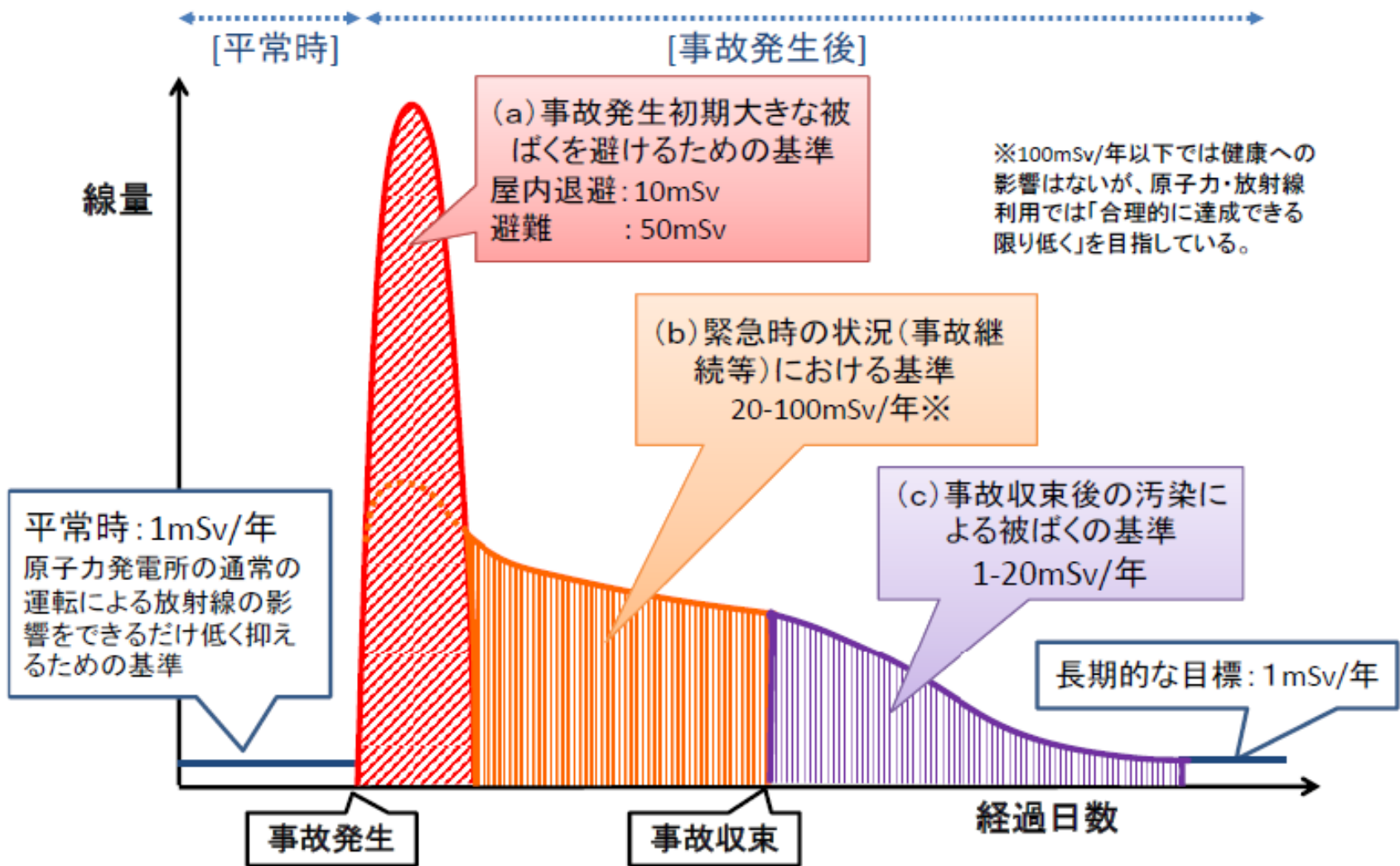
*第4次航空機モニタリング結果を参照

避難指示区域の状況**



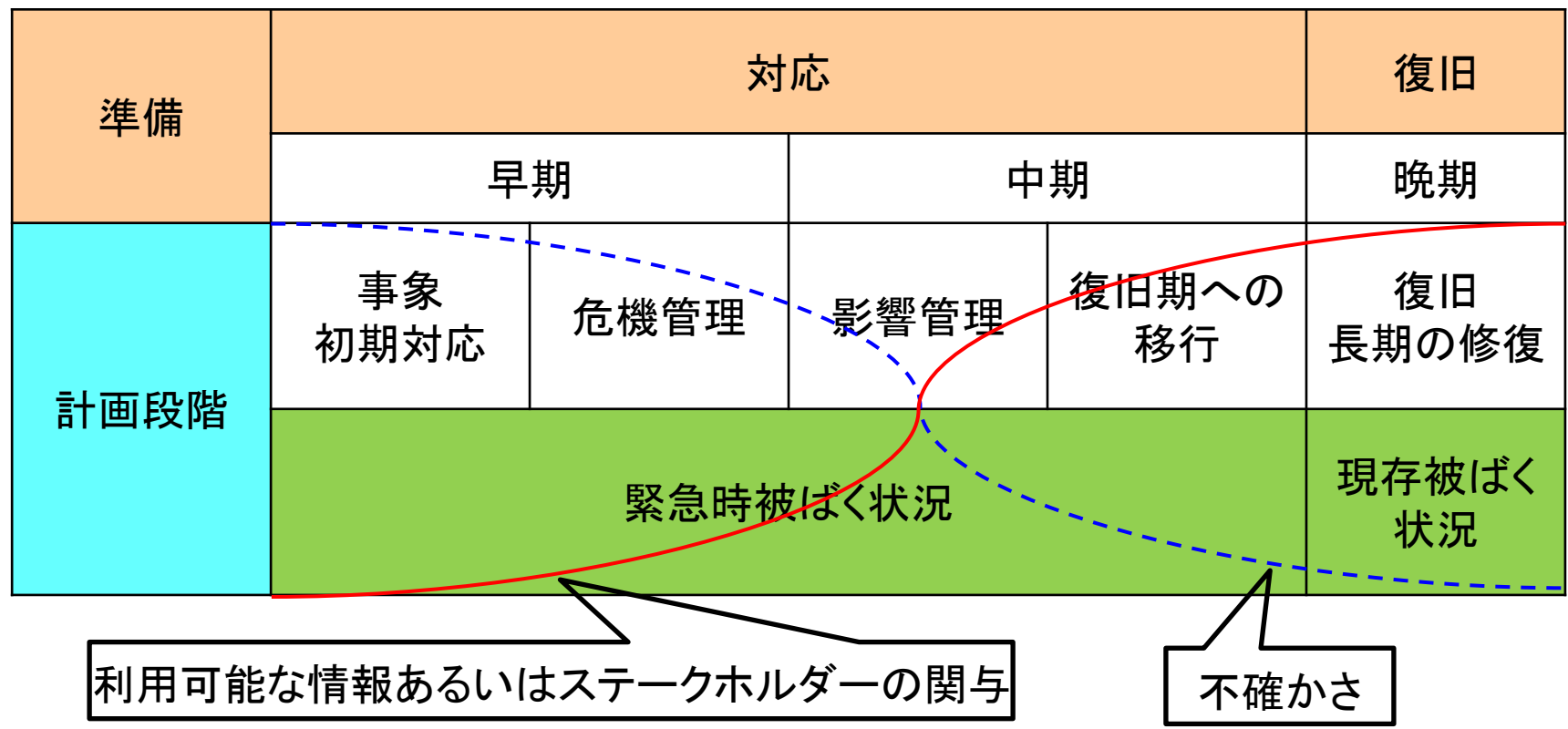
**福島民友より(2013年8月8日現在)

放射線防護の線量の基準の考え方*



*IAEAに対する政府の報告書(2011)より

緊急事態の時間的推移に対応した管理



国際放射線防護委員会(ICRP)の防護規準

ICRP 2007年基本勧告(Publ.103) 放射線防護の諸原則

- 正当化の原則
正味便益がプラスであることが必要。
被ばく経路を変更する対策により、被ばくが制御できる場合に利用。
- 防護の最適化の原則
経済的及び社会的要因を考慮して、被ばくの大きさを合理的に達成できる限り低く抑えるための線源関連のプロセス。
- 線量限度の適用の原則



正当化と最適化は、すべての被ばく状況下に適用

- 計画被ばく状況
- 緊急時被ばく状況
様々な状況から発生する可能性がある、好ましくない結果を避けたり減らしたりするために緊急の対策を必要とする状況
- 現存被ばく状況
緊急事態の後の長期被ばく状況を含む状況

緊急時被ばく状況下の防護

ICRP Publ.109 付属書Bより

- ヨウ素甲状腺ブロック
主として甲状腺疾患のリスク低減のための短期的措置(最大で数日間)
- 屋内退避
およそ2日より長い期間は推奨されない。
長期的な防護措置ではない。
- 避難
一般的に、1週間以上の期間の避難は推奨されない。
- 身体除染および医療介入
避難勧告外では必要にならないと考えられる。
- 農作物への予防的措置
 - ・影響下の地域で栽培された食物の消費禁止
 - ・井戸の覆い, 動物や動物飼料の避難
 - ・生産された食物や飼料の管理, 特にミルク管理は重要
 - ・事故初期時は, 飲料水は主要な関心事でないが, 定期的な監視必要



現存被ばく状況(長期的汚染地域)下の防護

-自助努力による防護措置が必要-

ICRP Publ.111付属書Aより

チェルノブイリ事故後のベラルーシの区域規準(1991)

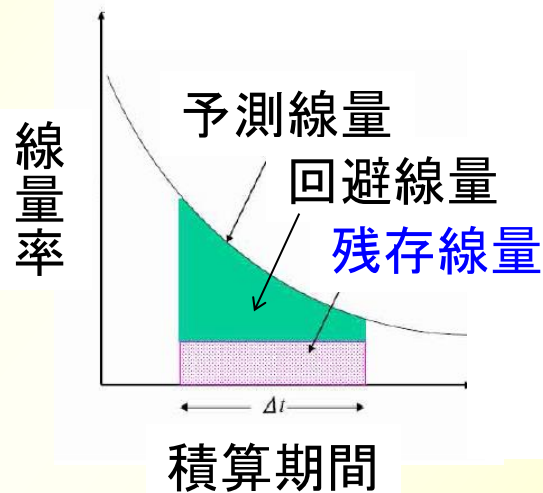
区域規準	区域への公的対応
$37 < {}^{137}\text{Cs} < 185 \text{ kBq/m}^2$ 個人線量 $< 1 \text{ mSv/年}$	定期的な放射線モニタリング
$185 < {}^{137}\text{Cs} < 555 \text{ kBq/m}^2$ $18.5 < {}^{90}\text{Sr} < 74 \text{ kBq/m}^2$ $0.37 < \text{Pu} < 1.85 \text{ kBq/m}^2$ 個人線量 $> 1 \text{ mSv/年}$	再定住権利を有する区域
$555 < {}^{137}\text{Cs} < 1480 \text{ kBq/m}^2$ $74 < {}^{90}\text{Sr} < 111 \text{ kBq/m}^2$ $1.85 < \text{Pu} < 3.7 \text{ kBq/m}^2$ 個人線量 $< 5 \text{ mSv/年}$	二次再定住区域
${}^{137}\text{Cs} > 1480 \text{ kBq/m}^2$ ${}^{90}\text{Sr} > 111 \text{ kBq/m}^2$ $\text{Pu} > 3.7 \text{ kBq/m}^2$ 個人線量 $> 5 \text{ mSv/年}$	優先再定住区域
避難区域 (立入禁止区域)	

参考レベルと防護措置

参考レベル*を使用する最適化の
プロセス適用



- すべての被ばく経路から生じるかもしれない被ばく全体に焦点
- 残存線量と参考レベルの比較
残存線量 = (予測線量) - (回避線量)



*参考レベルを上回る被ばく発生を許す防護措置の策定は不適切

参考レベルのバンド

急性もしくは 年間の線量 (mSv)	被ばく状況の例
20~100	放射線緊急事態
1~20	事故後の復旧段階を含む状況
~1	計画被ばく状況

IAEAの防護措置に係る一般基準

IAEA GSR Part7 付属書より(外部被ばく線量に関する規定の一部)

一般基準	防護措置例
<p>確定的影響防止のため, 急性外部被ばく(10時間未満) 赤色骨髄:1Gy (平均RBE荷重吸収線量) 胎児:0.1Gy (1Gy) 組織:25Gy(体表面から深部0.5cmで100cm²) 皮膚:10Gy(体表面から深部0.4mmで100cm²)</p>	<p>線量が予測された場合 線量が一般基準未満になるよう, 予防的緊急防護措置の履行(困難な状況においても), 公衆への情報提供や警告, 早期除染の履行</p>
<p>確率的影響リスク低減のため, 予測線量について 実効線量:100mSv(最初の7日間) 胎児の等価線量*:100mSv(最初の7日間) (*放射性ヨウ素のみは甲状腺等価線量)</p>	<p>緊急防護措置等の履行 屋内退避, 避難, 汚染のコントロール, 除染, 公衆への安心など</p>
<p>確率的影響リスク低減のため, 予測線量について 実効線量:100mSv(最初の1年間) 胎児の等価線量*:100mSv(子宮内発育全期間) (*外部及び内部被ばくともに)</p>	<p>早期の防護措置等の履行 一時的退避, 避難, 汚染のコントロール, 除染, 公衆への安心など</p>
<p>確率的影響リスク低減のため, 被ばく線量について 実効線量:100mSv(1月間)</p>	<p>長期医療対策の履行 放射線高感受性の臓器等価線量に基づく健康スクリーニング(医療追跡調査の基礎として), カウンセリングなど</p>
<p>確率的影響リスク低減のため, 被ばく線量について 胎児の等価線量*:100mSv(子宮内発育全期間) (*外部及び内部被ばくともに)</p>	<p>長期医療対策の履行 個々の状況下で説明を受けた上での決断を可能とするカウンセリング</p>

原子力規制委員会の原子力災害対策指針

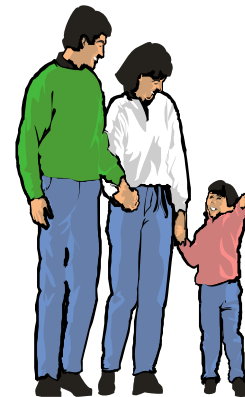
[指針の目的]

国民の生命及び身体の安全を確保することが最も重要であるという観点から、緊急事態における原子力施設周辺の住民等に対する放射線の影響を最小限に抑える防護措置を確実なものとする。

原子力災害

「原子力施設の事故等に起因する放射性物質又は放射線の異常な放出により生じる被害」

平成24年10月31日
(平成25年9月5日)全部改訂



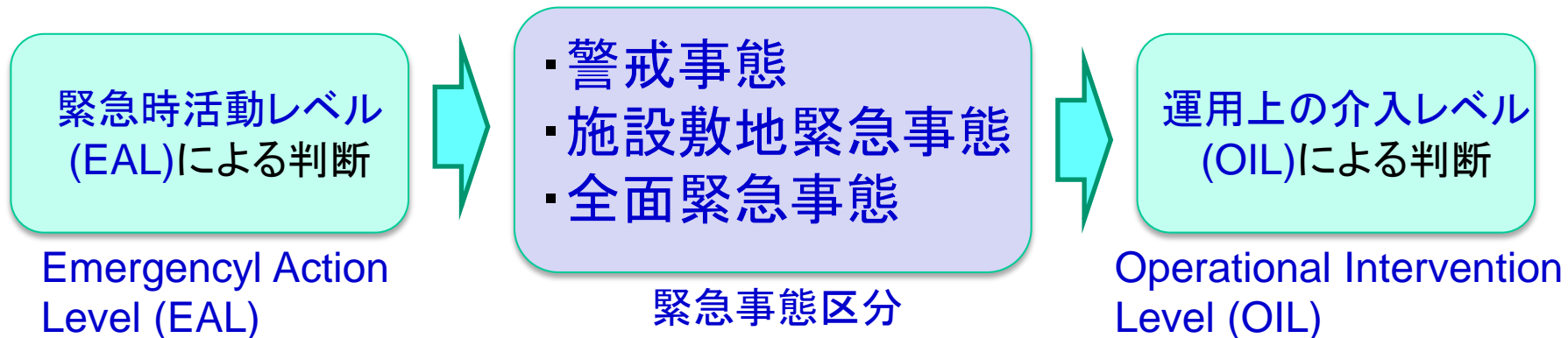
緊急事態への対応の状況(4段階) (1)

● 準備段階

原子力事業者, 国, 地方公共団体等がそれぞれの行動計画を策定して関係者に周知するとともに, これを訓練等で検証・評価し, 改善する必要がある。

● 初期対応段階

情報が限られた中でも, 放射線被ばくによる確定的影響を回避するとともに, 確率的影響のリスクを最小限に抑えるため, 迅速な防護措置等の対応を行う必要がある。



運用上の介入レベル(Operational Intervention Level (OIL))

防護措置の実施を判断する基準として, 空間放射線量等の原則計測可能な値で表わされる。

緊急事態への対応の状況(4段階) (2)

● 中期対応段階

放射性物質又は放射線の影響を適切に管理することが求められ、環境放射線モニタリングや解析により放射線状況を十分に把握し、それに基づき、初期対応段階で実施した防護措置の変更・解除や長期にわたる防護措置の検討を行う必要がある。

● 復旧段階

その段階への移行期に策定した被災した地域の長期的な復旧策の計画に基づき、通常の社会的、経済的活動への復帰の支援を行う必要がある。



緊急事態の初期対応段階

● 警戒事態

その時点では公衆への放射線による影響やそのおそれがある緊急のものではないが、原子力施設における異常事態の発生又はそのおそれがあるため、情報収集や、緊急時モニタリング(放射性物質若しくは放射線の異常な放出又はそのおそれがある場合に実施する環境放射線モニタリング)の準備、早期に実施が必要な災害時要援護者等(傷病者, 入院患者, 高齢者, 障害者, 外国人, 乳幼児, 妊産婦, その他の災害時に援護を必要とする者)の避難等の防護措置の準備を開始する必要がある段階

● 施設敷地緊急事態

原子力施設において公衆に放射線による影響をもたらす可能性のある事象が生じたため、原子力施設周辺において緊急時に備えた避難等の主な防護措置の準備を開始する必要がある段階

● 全面緊急事態

原子力施設において公衆に放射線による影響をもたらす可能性が高い事象が生じたため、確定的影響を回避し、確率的影響のリスクを低減する観点から、迅速な防護措置を実施する必要がある段階

原子力災害対策重点区域

● 予防的防護措置を準備する区域

(PAZ: Precautionary Action Zone)

急速に進展する事故においても放射線被ばくによる確定的影響等を回避するため、EALに依じて、即時避難を実施する等、放射性物質の環境への放出前の段階から予防的に防護措置を準備する区域
「原子力施設から概ね半径5km」目安

● 緊急時防護措置を準備する区域

(UPZ: Urgent Protective Action Planning Zone)

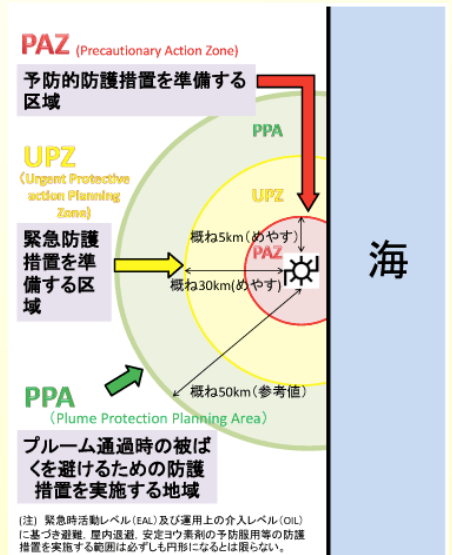
確率的影響のリスクを最小限に抑えるため、EAL, OILに基づき、緊急時防護措置の準備する区域
「原子力施設から概ね30km」目安

● プルーム通過時の被ばくを避けるための防護措置を実施する地域

(PPA: Plume Protection Planning Area)

プルーム通過時の防護措置用。UPZ外適用

区域概念*



*原子力安全委員会資料

防護措置の策定に関する線量

防護措置の策定・履行に関する外部被ばくに係る線量は、予測的かつ遡及的であるため、年齢や放射線照射形状を対象とする**実効線量**または**実効線量とみなす空間線量**(周辺線量当量や方向性線量当量)となると考える。

● 初期対応段階

地上1mで計測した場合の空間線量率

EAL(原災法10条の通報すべき基準) e.g. 5 μ Sv/h

EAL(原災法15条の原子力緊急事態宣言の基準等) e.g. 500 μ Sv/h

OIL e.g. 0.5 μ Sv/h(OIL6), 20 μ Sv/h(OIL2), 500 μ Sv/h(OIL1)

● 中期対応段階および復旧段階

地上1mで計測した場合の空間線量率

個人線量

実効線量



* 内部被ばくに係る線量は、(預託)実効線量や(預託)等価線量

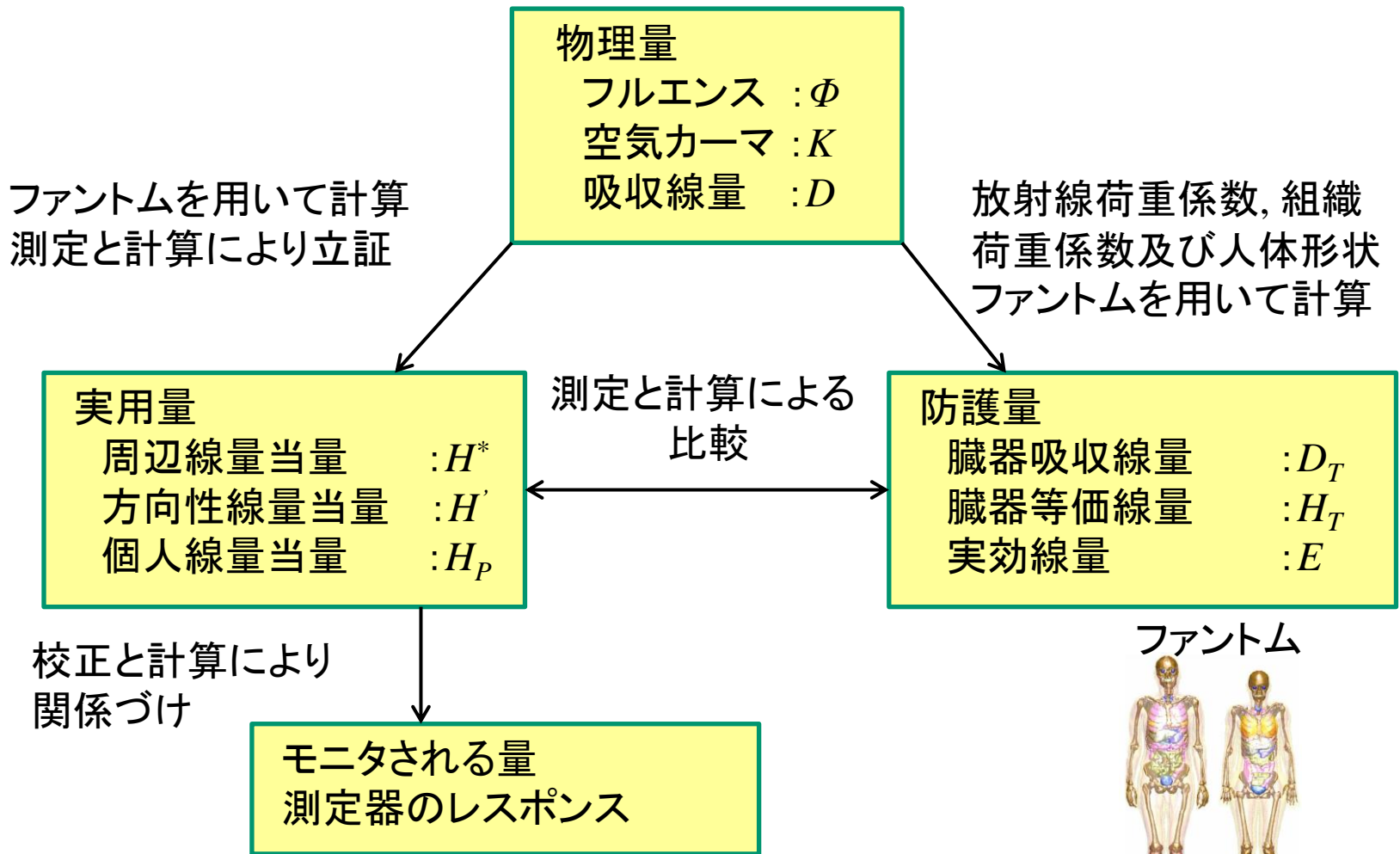
放射線の線量

- 照射線量(exposure)
- 吸収線量(absorbed dose)
- カーマ(kerma)
- 放射線防護で用いる線量
 - a. 周辺線量当量(ambient dose equivalent)
 - b. 方向性線量当量(directional dose equivalent)
 - c. 個人線量当量(personal dose equivalent)
 - d. 等価線量(equivalent dose)
 - e. 実効線量(effective dose)
 - f. 1cm線量当量, 70 μ m線量当量

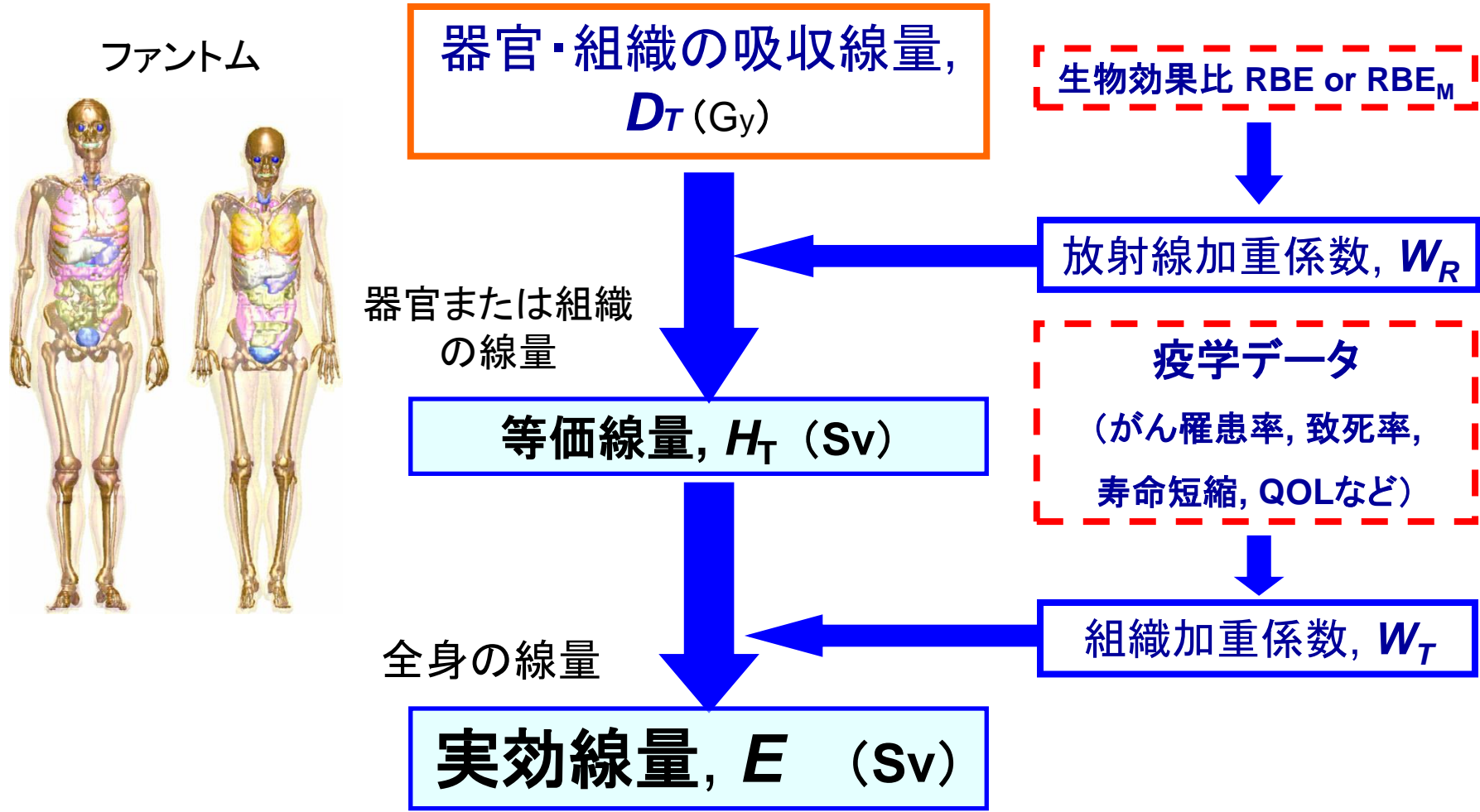


放射線防護で用いる線量

外部被ばく線量のための諸量間の関係



実効線量と等価線量



周辺線量当量 $H^*(d)$

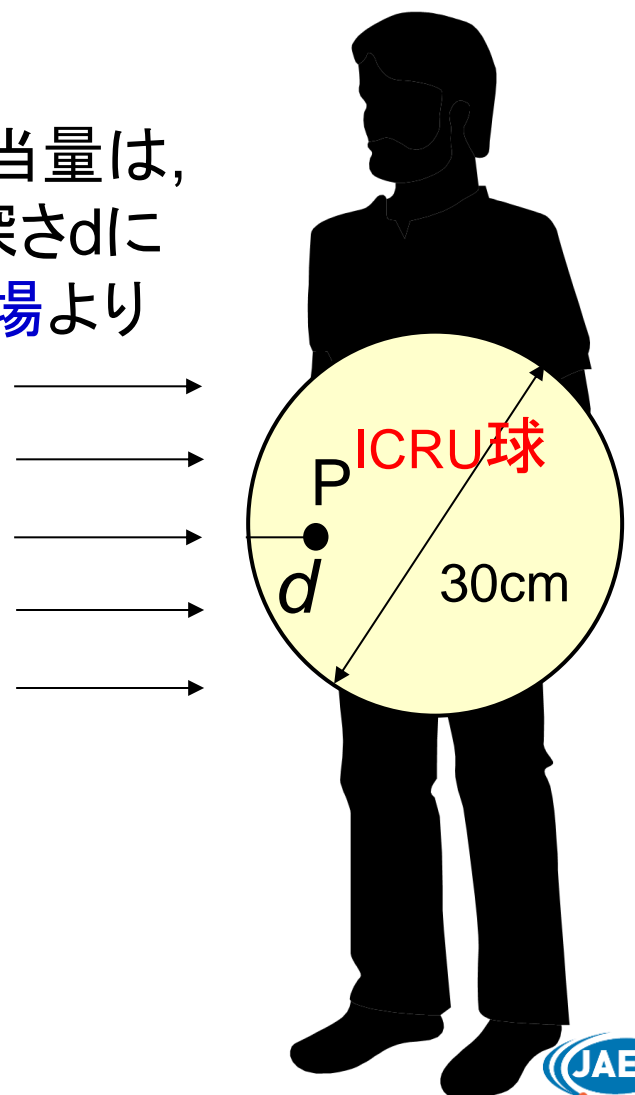
単位 J/kg Sv

〈定義〉

「ある放射線場の1点における周辺線量当量は、ICRU球の整列場に対向する半径上の深さdにおいて、ICRU球中の対応する整列拡張場より作られる線量当量」

ICRU球：密度1g/cm³ の
組織等価物質からなる
直径30cm の球ファントム
(実在しない！)

- O: 76.2%
- C: 11.1%
- H: 10.1%
- N: 2.6% (重量%)



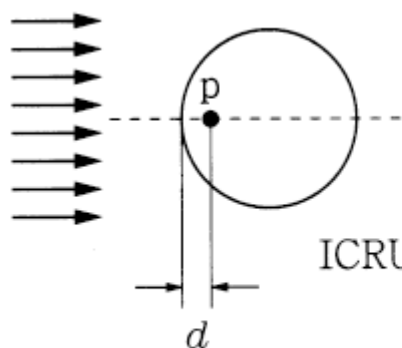
方向性線量当量 $H'(d, \Omega)$

単位 J/kg Sv

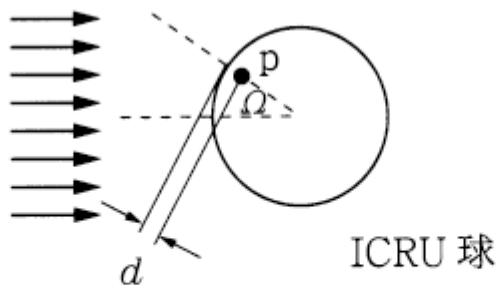
〈定義〉

「ある放射線場の1点における方向性線量当量は、ICRU球内の指定されたある方向の半径上の深さdにおいて、対応する拡張場によって生じる線量当量」

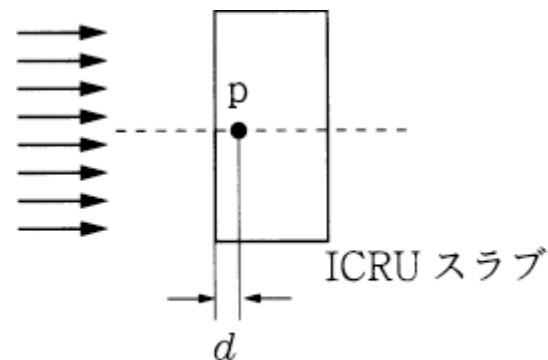
実用量の概念図*



(a) 周辺線量当量 $H^*(d)$



(b) 方向性線量当量 $H^*(d, \Omega)$



(c) 個人線量当量 $H_p(d)$

*放射線計測学より

個人線量当量 $H_P(d)$

単位 J/kg Sv

〈定義〉

「個人線量当量とは、人体上のある指定された点における適切な深さdにおける線量当量」

個人線量計の校正には、30cm × 30cm × 15cm
のICRUスラブファントムを用いる。

$H_{P,slab}(d, \alpha)$ 強透過性放射線: d=10mm

弱透過性放射線: d=0.07mm(皮膚)

Dr. M. Zankl(Health Phys. 1999)

“The numerical values of the personal dose equivalent depend on the exact position of the dosimeter, with maximum differences between 12% and 80%, depending on the beam geometry.”



個人線量当量は多価量。評価に用いる個人線量計の着用部位重要！
個人線量計等を用いて測定された個人の被ばく線量(個人線量)と同意？

空間線量と個人線量

- 国における避難指示解除の要件より
「空間線量率で推定された年間積算線量が20mSv以下になることが確実であること」
- 原子力規制委員会の「帰還に向けた安全・安心対策に関する基本的考え方」より
「帰還後の住民の被ばく線量の評価は、空間線量率から推定される被ばく線量ではなく、個人線量*を用いることを基本とすべきである」



*個人線量計等を用いて測定された個人の被ばく線量

将来の線量を予測し、最適化プロセスを検討する場合、
個人線量当量の推定は定義上困難であるため、
空間線量率が対象になる。

空間線量率の予測モデル開発(例)

2成分1コンパートメントモデルである分布状況変化モデル(予測モデル)適用

$$D(t) = (D_0 - D_{BG}) \left\{ f_{fast} \exp(-\ln 2 / T_{fast} \cdot t) + (1 - f_{fast}) \exp(-\ln 2 / T_{slow} \cdot t) \right\} \frac{k \exp(-\lambda_{134} t) + \exp(-\lambda_{137} t)}{k + 1} + D_{BG}$$

ここで、

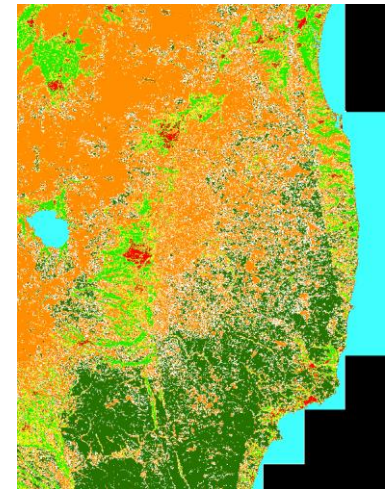
$D(t)$: 経過時間 t [y]における空間線量率 [$\mu\text{Sv/h}$]
D_0	: 初期空間線量率 [$\mu\text{Sv/h}$]
D_{BG}	: バックグラウンド空間線量率 [$\mu\text{Sv/h}$]
f_{fast}	: 減衰が速い成分の割合 [-]
T_{fast}	: 減衰が速い成分の環境半減期 [y]
T_{slow}	: 減衰が遅い成分の環境半減期 [y]
k	: ^{134}Cs の ^{137}Cs に対する初期空間線量率比 [-]
λ_{134}	: ^{134}Cs の壊変定数 [y^{-1}]
λ_{137}	: ^{137}Cs の壊変定数 [y^{-1}]

である。

帰還などの住民の将来設計, 適切な除染対策の選択などに役立てるため,
ALOS土地利用形態別などの地域特性を反映!

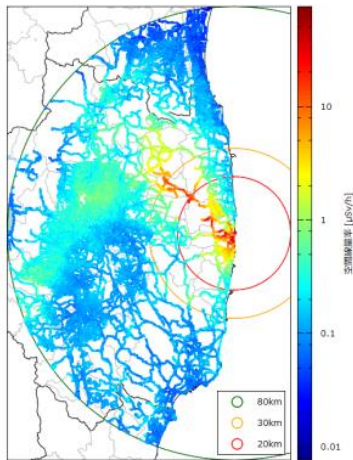
生活圏の空間線量率測定データを基盤 (走行サーベイなどの測定データを活用)

ALOS土地利用
土地被覆図

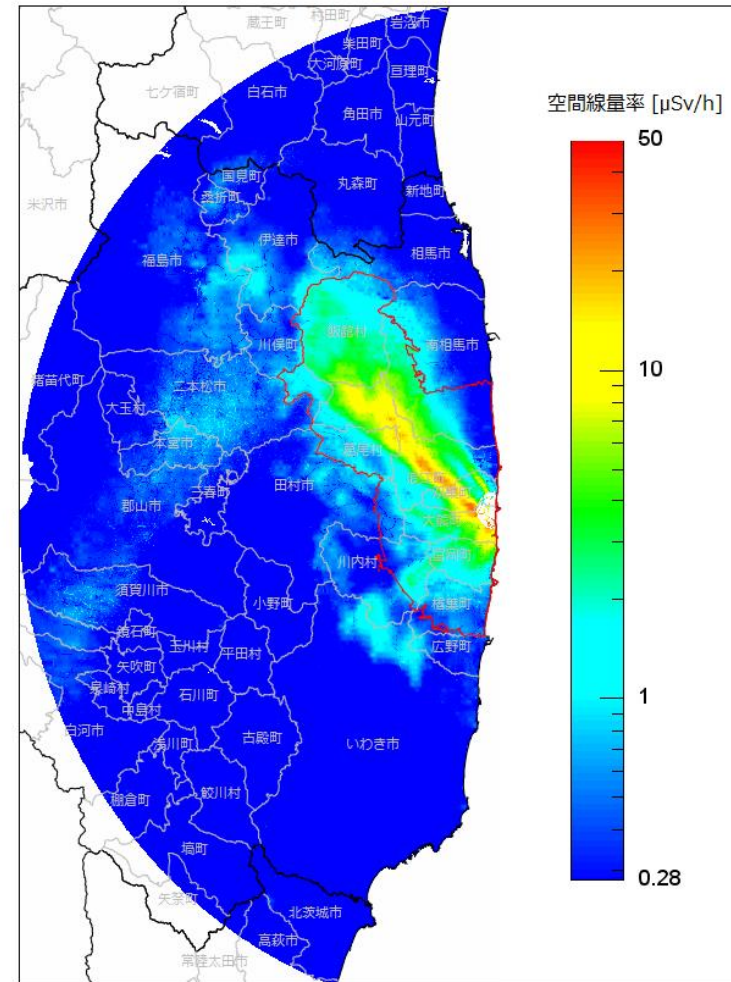


2013年9月27日(事故後2.538年)の 空間線量率(例)

第6次走行サーベイ

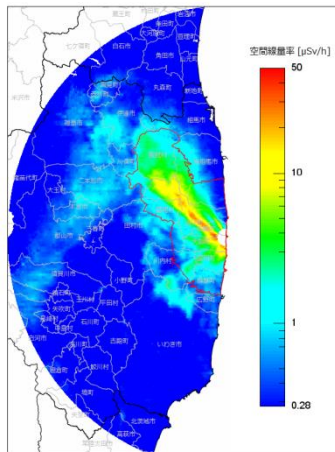


生活圏を考慮した空間線量率分布



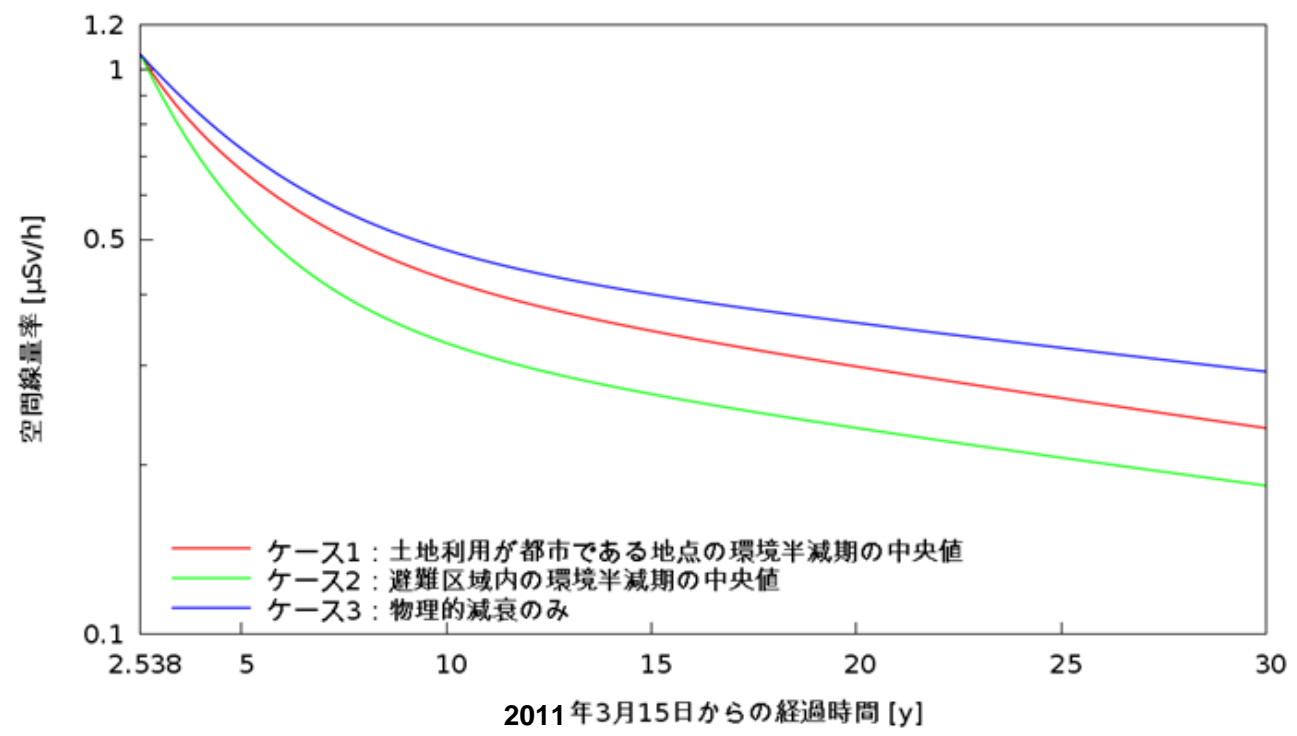
歩行サーベイ等による補正

第7次航空機モニタリング



空間線量率の経時変化(例) -ALOS土地利用種別「都市」の場合-

「2成分1コンパートメントモデルによる、
2013年9月27日(事故後2.538年)の空間線量率を基準とした推定」



「都市(環境半減期(中央値)0.57年)」では「減衰が速い成分」の減少割合が大きいと評価されることにより、現時点ですでに「減衰が速い成分」が少なくなっているのに対し、「避難区域内(環境半減期(中央値)1.3年)」では未だ「減衰が速い成分」が残存していると評価されるため、現時点以降の空間線量率は「避難区域内(環境半減期(中央値)1.3年)」の方が低くなると評価される。

まとめ

- 東電福島第1発電所事故に関して、環境中に放出された放射性物質による影響、我が国の緊急防護措置、防護措置に関する線量についてレビューした。
- 時空間的に変化する緊急防護措置に関し、実効線量とみなすことができる実用量(空間線量や個人線量)に基づき迅速に実行できるような枠組みが構築される。
- 参考レベルを使用する最適化プロセスには、空間線量率の予測が必要と考える。